

文章编号:1000-8055(2012)02-0365-07

涡轮级间双涡燃烧室的出口温度分布试验

王伟俭¹, 杜尚明², 张荣春¹, 覃文隆¹, 樊未军¹

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;

2. 国电电力发展股份有限公司 国电电力大同发电有限责任公司, 山西 大同 037043)

摘 要: 在单涡燃烧室研究的基础上,对双涡燃烧室进行出口温度分布试验研究,得到了影响出口温度分布系数(OTDF)的因素如下:①随着主流马赫数的增加,出口温度分布系数减小;②主流温度对出口温度分布影响较大,出口温度分布系数随主流温度的增加而减小;③随着余气系数的增大,出口温度分布系数都有先增大后趋于平缓或减小的过程;④不同的凹腔结构对出口温度分布系数的影响很大,综合各个试验件结果,深宽比为 0.8,后体进气方式为开槽进气的双 1 试验件的出口温度分布系数最小。

关 键 词: 驻涡燃烧室; 双涡; 涡轮级间; 流动参数; 出口温度分布系数

中图分类号: V235.11

文献标志码: A

Experiment on overall temperature distribution of the inter-stage turbine double vortex combustor

WANG Wei-jian¹, DU Shang-ming², ZHANG Rong-chun¹,TAN Wen-long¹, FAN Wei-jun¹

(1. School of Jet Propulsion,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. Guodian Datong Power Generation Company Limited,

Guodian Power Development Company Limited, Datong Shanxi 037043, China)

Abstract: Based on the single vortex combustor, the influential factors of overall temperature distribution in the double vortex combustor were studied experimentally. The results of experiments were obtained showed that: (1) With the Mach number Ma of mainstream increase, the overall temperature distribution factor (OTDF) decrease. (2) The mainstream temperature has great impact on the overall temperature distribution, the OTDF decrease with the increase of mainstream temperature. (3) With the excess air coefficient increase, the OTDF increase firstly and then level off or decrease. (4) Different cavity structures have a great impact on the OTDF, after compare several test pieces, the piece which the aspect ratio is 0.8, the after-body intake is slot air intake could achieve the best OTDF.

Key words: trapped vortex combustor; double vortex; inter-stage turbine; flow parameters; overall temperature distribution factor (OTDF)

驻涡燃烧室(TVC)作为燃烧器,具有结构简单紧凑、低成本和低污染排放的巨大潜力。对航空和地面燃气轮机 NO_x 排放物的关注,推动了驻涡

燃烧室的发展。到目前为止,驻涡燃烧室的研究已经发展到第四代^[1-3]。TVC 凹腔内流场与主流区域的流场相对独立,当凹腔大小合适,在很高的来

收稿日期:2011-03-14; 修订日期:2011-07-21

作者简介:王伟俭(1988—),男,山东济宁人,硕士生,主要从事航空发动机燃烧室设计及性能方面研究。

流速度下,凹腔内也可以形成稳定的回流区.燃料与空气以一定的方式注入凹腔内,达到改善燃料浓度场和加强涡强度的作用^[4-5].

驻涡燃烧室有单涡和双涡两种形式.单涡一般采用后体顶部进气,双涡一般采用前体顶部供油,后体中部进气^[3-6].TVC 可以应用为军用发动机的主燃烧室和富油燃烧-淬熄-贫油燃烧(RQL)的低污染燃烧室,还可以应用于紧凑燃烧技术(ultra compact combustion,简称 UCC)^[7-10],国外对这方面进行了大量的研究.国内主要有北京航空航天大学、南京航空航天大学和部分研究所对 TVC 进行了数值模拟与试验研究,研究了燃烧室内的流动、传热、油气混合以及排气污染等方面^[3,6,10],本课题组研究的 TVC 工作在燃气涡轮和动力涡轮之间,称为级间驻涡燃烧室.针对其应用于涡轮级间燃烧的背景,设计适用于高速进口气流条件的贫油双涡驻涡燃烧室,这样可以在低氧低压等条件下提高发动机的功率,增强其适用性^[11-12].孔祥雷等人研究了单涡/贫油驻涡燃烧室的出口温度分布^[13],而对于双涡-级间驻涡燃烧室这方面的研究较少.

燃烧室出口温度分布系数(OTDF)是衡量出口温度分布好坏的重要标志,主要关系到涡轮的工作环境,它定义为燃烧室出口界面内最高燃气总温与燃气平均总温之差与燃烧室温升的比值,即(其中 t_{4max} 为出口截面最高温度, t_{3ave} 和 t_{4ave} 分别为燃烧室进、出口平均温度)

$$\lambda_{otdf} = \frac{t_{4max} - t_{4ave}}{t_{4ave} - t_{3ave}}$$

级间燃烧室和主燃烧室及小型燃烧室有明显的区别,主要在于两点:一是燃烧室主流马赫数高,相对主燃烧室和小型燃烧室的主流马赫数 0.14~0.30,在主燃烧室后经过一次加温的级间燃烧室的主流马赫数达到了 0.40~0.50;二是级间燃烧室温升小,设计温升为 200~300℃,而主燃烧室和小型燃烧室的温升在 500~1000℃的范围.温升小会导致 OTDF 表达式中分母变小,因此分子(热点 t_{4max} 与出口平均温度之差)稍微偏高便会带来出口温度场的均匀性变差,造成 OTDF 值过大.

本文针对某用于级间燃烧的双涡驻涡燃烧室的出口温度分布特性进行了试验,通过对试验结果的分析得出了 OTDF 随着各种变量的变化特性.并且对已有的 TVC 的凹腔后体进气方式及凹腔尺寸结构进行改变,研究不同结构的燃烧室

对 OTDF 的影响,总结最佳的设计规律,可作为燃烧室优化设计的依据.

1 试验系统

1.1 试验件

本文试验件方案采用矩形三头部蒸发管双涡驻涡方案,双涡试验件设计成四种变化方案.通过不同凹腔方案的比较,研究主流参数、余气系数以及凹腔几何尺寸变化对出口温度分布影响的规律.

本文将凹腔深宽比定义为凹腔前体高度与凹腔底部长度的比值,见双涡燃烧室结构示意图(图 1).双涡矩形试验件针对不同方案变化的试验件分别为双 1、双 2、双 3 和双 4.四种试验件周向距离 300 mm,相邻两个蒸发管中心线距离 111 mm,蒸发管长 40 mm,两侧蒸发管距离侧壁 39 mm.其中双 1 为基准件,凹腔底部长 48 mm,前体高 38 mm,其深宽比为 0.8,后体开槽进气.双 2 与标准件凹腔尺寸相同,后体为开孔进气,双 1 的进气量比开孔的双 2 试验件要大 15%左右.双 3 和双 4 试验件分别为凹腔底部加长和凹腔前体加长,见表 1.

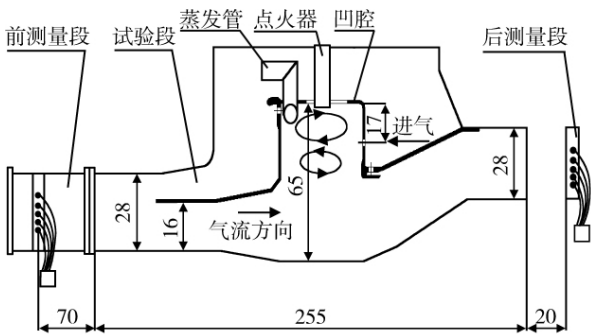


图 1 双涡驻涡燃烧室试验件图(单位:mm)

Fig. 1 Schematic diagram of double trapped vortex combustor(unit:mm)

表 1 不同双涡试验件方案说明
Table1 Description of different TVC

双涡方案	深宽比	后体进气方式
双 1	0.8	开槽进气
双 2	0.8	开孔进气
双 3	0.72	开槽进气
双 4	0.87	开槽进气

1.2 进出口温度测点

图 1 表明了试验段的基本尺寸,试验件总长 255 mm,前测量段距离试验段进口 70 mm,试验

段出口距离后测量段测点 20 mm. 进口测量段采用 5 支测量耙布置, 其中两侧及中间测量耙为温度测量耙, 温度测量耙采用 K 型热电偶, 测量不确定度为 $\pm 0.5\%$. 三个温度测量耙中间间隔为两支压力测量耙. 出口测量采用位移机构结合 5 支测量耙, 见图 2. 虚线内区域为测量区域, 温度测量耙和压力测量耙固定在位移机构上, 控制位移机构从左至右移动. 根据测量耙子纵向测量点数和横向移动距离可以在中心蒸发管燃烧区域内满

足 1 点/ cm^2 的测量要求.

矩形试验段进出口测量段 y 方向高度为 28 mm, 计算进出口平均温度及压力采用算术平均结合面积平均方法: 沿 y 方向 5 个测量点, 最上面和最下面的测点对应测量截面高度为 5 mm, 中间三个测点对应测量截面高度为 6 mm. y 方向采用面积平均计算进出口平均温度及压力, x 方向采用算术平均计算进出口平均温度和压力, 两次平均后得到最终的进出口平均压力和温度.

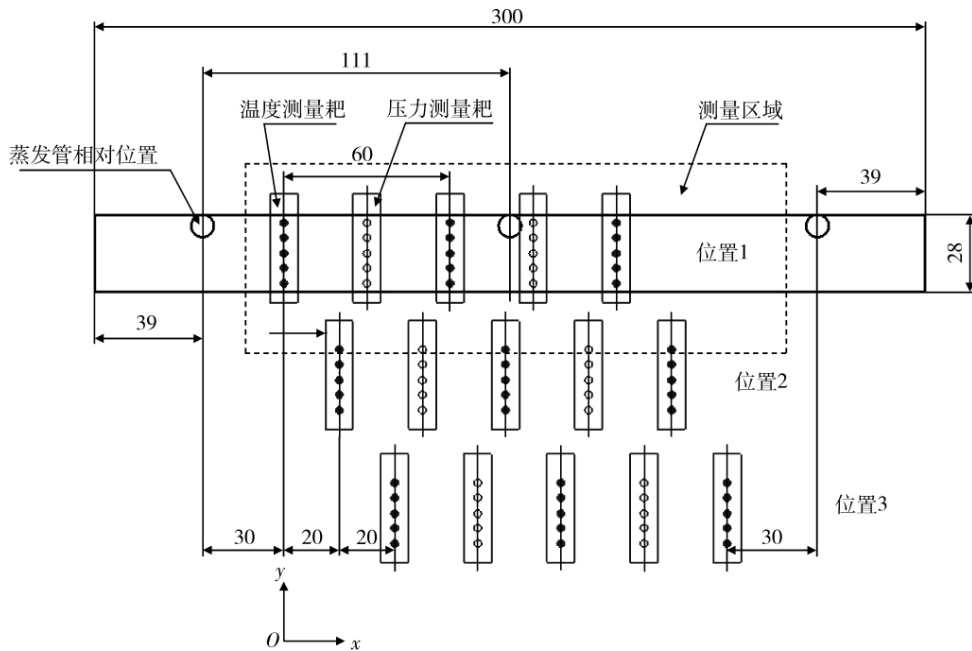


图 2 出口压力温度测量方式示意图(单位: mm)

Fig. 2 Schematic diagram of measure outlet pressure and temperature (unit: mm)

1.3 试验系统

本文进行的试验是在北京航空航天大学热动力研究所驻涡燃烧试验台上进行. 整个试验系统如图 3. 试验使用的燃料为航空煤油. 主流压缩空气经过调压阀和电磁阀调节后, 通过孔板流量计测量主流流量, 然后主流的空气经过加温燃烧器间接加热, 通过孔板流量计和加温器的供油调节使得空气参数达到要求状态, 之后进入驻涡燃烧室试验件进口进行驻涡燃烧室燃烧试验.

1.4 试验方法

在试验中, 首先研究主流参数的变化对出口温度分布的影响, 主流参数主要包括主流马赫数和主流温度. 热态温升和燃烧室的余气系数有关, 可以用余气系数 ($9 \leq \alpha \leq 11$; $13 \leq \alpha \leq 14$; $16 \leq \alpha \leq 18$; $25 \leq \alpha \leq 28$) 把燃烧系统内的燃烧分为四个状

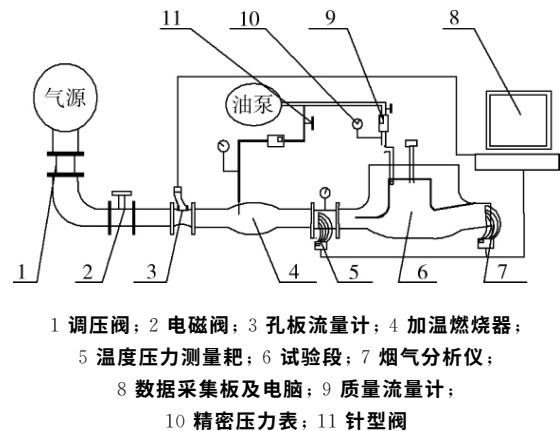


图 3 驻涡燃烧室试验系统图

Fig. 3 System of TVC test device

态, 即代表了不同的温升. 研究在不同状态下, OTDF 随主流马赫数和温度的变化关系. 其次研究在一定的主流条件下, 不同的余气系数对 OTDF

的影响. 最后研究凹腔结构变化对出口温度分布的影响.

2 试验结果与分析

本文研究的驻涡燃烧室用于级间燃烧, 而燃烧室的出口温度分布既反映了燃烧室工作过程组织的完善程度, 又对涡轮部件产生重要影响, 特别是耐久性与寿命, 因此是燃烧室的重要性能指标之一. 本文利用大家常用的出口温度分布系数, 国内以及欧洲称之为 OTDF 来评估出口温度分布的好坏. 对于满足要求的燃烧室而言, OTDF 值如果在 0.25~0.35 之间比较满足条件(对于中型以上发动机 OTDF 的值通常在 0.25~0.35 之间), 但是发动机对级间燃烧室提出了 200~300℃ 小温升的要求, 这势必会造成因 $t_{4\max}$ 微小变化而导致的 OTDF 偏大, 因此在试验中, 很难达到 OTDF 值在 0.25~0.35 之间的要求.

双 1 试验件各状态的 OTDF 介于 0.3~1.0 之间. 选取主流温度为 350℃, 主流马赫数 $Ma = 0.41$, 余气系数 $\alpha = 26.43$, 在该状态下分析此试验件的出口温度分布特性. 从图 4 可以看出, 左侧温度分布较为均匀, 而中间区域温度偏低, 右侧温度过高, 此时 OTDF 值为 0.57, 这说明局部温度的偏高会导致 OTDF 偏大.

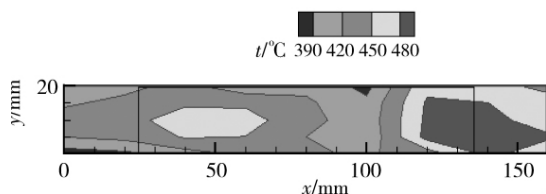


图 4 出口温度分布图

Fig. 4 Overall temperature distribution diagram

OTDF 由公式 $\lambda_{otdf} = \frac{t_{4\max} - t_{4ave}}{t_{3ave} - t_{4ave}}$ 计算, 其中 $t_{4\max}$ 为出口截面最高温度, t_{3ave} 和 t_{4ave} 分别为燃烧室进、出口平均温度.

试验时, 仅改变某一试验参数, 其他参数保持不变.

2.1 主流马赫数变化对出口温度分布的影响

图 5 和图 6 是在一定主流温度下, 固定燃烧室总余气系数(分别调整为上述四种状态), 双 1 和双 2 试验件在不同主流马赫数状态下的 OTDF. 如图 5 所示, 在各试验状态下, 双 1 试验件的 OTDF 介于 0.3~1.0 之间, OTDF 随主流马赫数的增加而减小. 如图 6 所示, 双 2 试验件的 OTDF

介于 0.6~1.1 之间, OTDF 随主流马赫数的增加也相应的减小. 可见主流马赫数对出口温度分布系数的影响很显著. 通过对比发现, 双 1 试验件的 OTDF 值要小一些, 这是因为双 1 后体开槽进气方式要比开孔方式进气量增加 15% 左右, 这对燃烧掺混过程极为有利. 试验结果表明双 1 的出口温度分布更均匀, 在部分试验条件下, OTDF 基本达到发动机的要求.

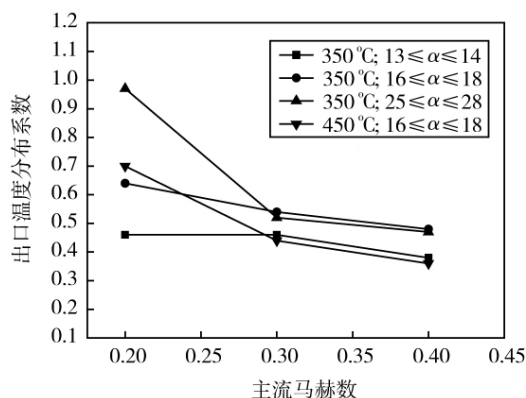


图 5 双 1 试验件 OTDF 随主流马赫数的变化

Fig. 5 OTDF of double 1 varies as Ma

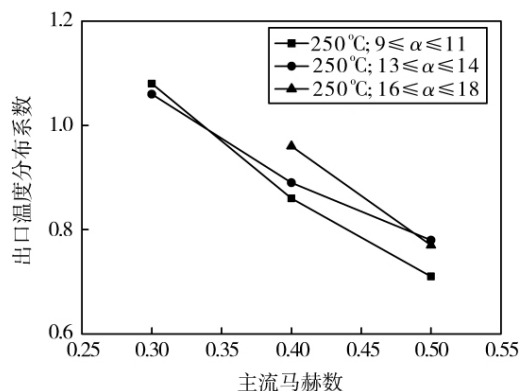


图 6 双 2 试验件 OTDF 随主流马赫数的变化

Fig. 6 OTDF of double 2 varies as Ma

OTDF 随主流马赫数的增加而减小, 这与常规燃烧室所体现出的规律有所不同. 这是因为贫油驻涡燃烧室采用的是进气一体式设计, 主流进气一部分从主流通道流出, 另外一部分进入到冷却腔内. 由冷却腔进入到蒸发管、掺混孔以及通过冷却孔进入凹腔. 当主流流量增大时, 这三部分气量也同时增大. 使得凹腔内的燃烧变贫, 火焰变短; 同时进入掺混孔的气量也同时增大, 有利于燃气与未燃空气的掺混, 这样使得出口温度场分布变得均匀.

2.2 主流温度变化对出口温度分布的影响

图7和图8是在一定主流马赫数条件下,固定燃烧室总余气系数(分别调整为上述四种状态),双1和双2试验件在不同主流温度状态下的OTDF.如图7所示,在两种主流温度下,双1试验件的OTDF介于0.3~0.6之间,OTDF随主流温度的增加而减小.如图8所示,双2试验件的OTDF介于0.4~1.0之间,OTDF随主流温度的增加先减小后趋于平缓的过程.

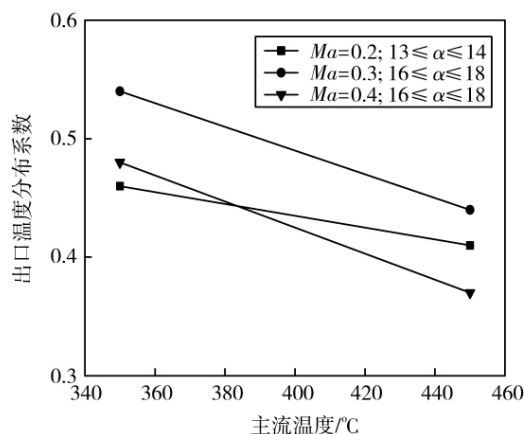


图7 双1试验件 OTDF 随主流温度的变化

Fig. 7 OTDF of double 1 varies as t_{main}

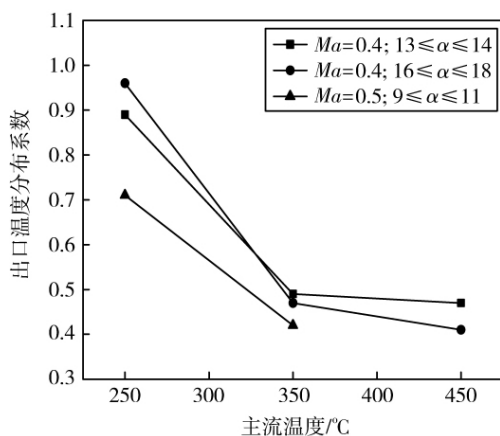


图8 双2试验件 OTDF 随主流温度的变化

Fig. 8 OTDF of double 2 varies as t_{main}

从图7还可以看出,主流温度的升高对出口温度分布均匀有利.这是由于主流温度的升高,进入蒸发管内的气体温度升高,有利于进入蒸发管的燃油蒸发,对火焰的稳定性有利,同时良好的蒸发效果使得油气混合中气体的比例增大,燃烧更加均匀,直接改善出口温度场.但是由于整个燃烧室的温升较小($100 \sim 200^\circ\text{C}$),所以使得燃烧室出口温度分布系数整体偏大.

图8是三种主流温度下双2试验件 OTDF,

如下图所示,在主流温度偏低时,OTDF 随主流温度的增加迅速降低,这说明这时主流温度是影响 OTDF 的关键因素,但随着主流温度的继续增大,OTDF 变化并不明显,可见这时主流温度对试验件的出口温度分布系数的影响不大.

2.3 余气系数变化对出口温度分布的影响

图9和图10分别是双1和双2试验件,出口OTDF 分布与余气系数之间的关系.图中列取的主流工况不完全一致,但是在两幅图中,各个试验件在不同余气系数下表现出来的 OTDF 总的变化规律相似,总体来看都是随着余气系数的增大,OTDF 分布都有先增大后趋于平缓或减小的过程.

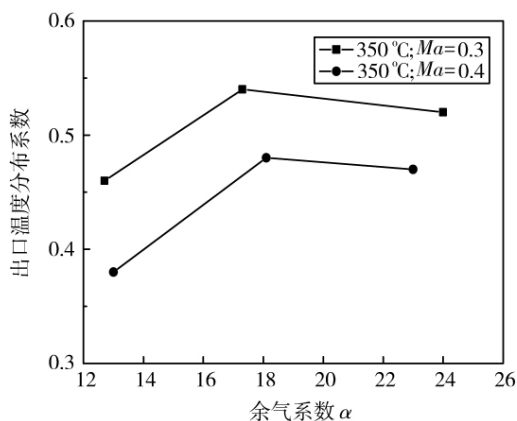


图9 双1试验件 OTDF 随余气系数的变化

Fig. 9 OTDF of double 1 varies as excess air coefficient

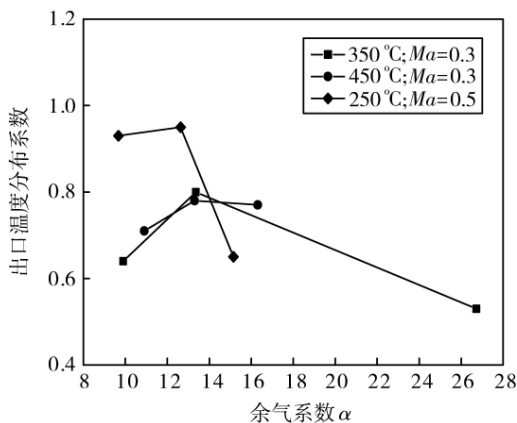


图10 双2试验件 OTDF 随余气系数的变化

Fig. 10 OTDF of double 2 varies as excess air coefficient

抛开主流工况和两种试验件不同对出口温度分布的影响,两个试验件都表现出相同的规律,即 OTDF 由小变大,再由大变小的趋势.随着余气系数的变化,直接体现在凹腔油气比的变化,在常

压试验中也表现在凹腔火焰长度的变化. 余气系数大的时候, 燃烧产物温度降低, 造成温升低, 这对 OTDF 的减小不利, 但燃烧火焰较短, 在出口平直段可以达到相对较好的掺混效果, 这对 OTDF 的减小极为有利; 而余气系数小的时候, 凹腔油气比较大, 火焰长度增加, 同样会带来温升增加和掺混的问题. 由此看来, 余气系数对 OTDF 的影响是通过温升的改变和掺混过程共同作用的.

结合驻涡燃烧室应用于涡轮级间的背景, 在设计时要充分考虑到余气系数对火焰长度, 温升和掺混过程的影响, 使得燃气在达到涡轮盘时具有良好的温度场分布.

2.4 凹腔结构变化对出口温度分布的影响

在主流温度为 350°C 的条件下, 固定燃烧室余气系数为 13~15 之间, 对四个不同的试验件进行试验来研究凹腔结构的变化对出口温度分布的影响.

图 11 是双 1、双 2、双 3 和双 4 试验件出口 OTDF 的比较图. 从图中可以看到, 在几乎相同余气系数(余气系数约为 13~15)条件下, 双 1 和双 2 试验件出口 OTDF 数值都要比双 3 和双 4 小, 出口温度分布更加均匀, 其中双 1 出口温度分布系数最低, 可接近 0.35. 在主流马赫数大于 0.4 时, 双 2 试验件出口 OTDF 接近 0.40, 但随主流马赫数的增加变化不明显. 双 1 与双 2 相比, 这说明把后体进气方式由开孔改为开槽, 可以有效增加进气量, 对于有效组织燃烧, 改善出口温度分布极为有利.

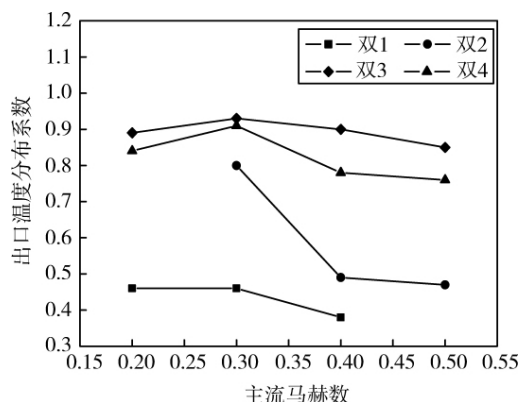


图 11 四种试验件 OTDF 随主流马赫数的变化

Fig. 11 OTDF of four test pieces varies as Ma

双 3 和双 4 试验件的 OTDF 随主流马赫数的增加而减小, 变化趋势与双 1 和双 2 基本一致, 但是 OTDF 在整个试验条件下介于 0.7~1.0 之

间, 数值偏大, 很难满足要求. 这是由于双 3 凹腔底部长度的改变造成了双涡试验件凹腔内流场和出口段掺混孔流动的改变, 这使其在同样条件下燃气与未燃气体掺混效果变差. 双 4 试验件前体高度的变化也可能削弱了进入到凹腔的未燃空气与燃气掺混的力度, 使得出口温度场不均匀.

3 结 论

本文通过对试验数据进行研究分析, 得出了有关双涡级间燃烧室出口温度分布的如下规律:

- 1) 随着主流马赫数的增加, 出口温度分布系数减小, 主流速度是影响出口温度分布的主要因素.
- 2) 主流温度对出口温度分布影响较大, OTDF 随主流温度的增加而减小.
- 3) 随着余气系数的增大, 双涡试验件的 OTDF 都有先增大后趋于平缓或减小的过程.
- 4) 不同凹腔几何结构对贫油熄火余气系数的影响很大, 综合各个试验件结果, 深宽比为 0.8, 后体进气方式为开槽进气的双 1 试验件的出口温度分布最均匀, OTDF 最小.

参考文献:

- [1] Roquemore W M, Shouse D, Burrus D, et al. Trapped vortex combustor concept for gas turbine engines[R]. AIAA-2001-0483, 2001.
- [2] Hsu K Y, Goss L P, Roquemore W M. Characteristics of a trapped-vortex combustor[J]. Journal of Propulsion and Power, 1998, 14(1): 57-65.
- [3] 樊未军, 易琪, 严明, 等. 驻涡燃烧室凹腔双涡结构研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(9): 66-70.
FAN Weijun, YI Qi, YAN Ming, et al. Research of double vortex structure in trapped vortex combustor[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2006, 26(9): 66-70. (in Chinese)
- [4] Hsu K Y, Goss L P, Trump D D, et al. Performance of a trapped-vortex combustor[J]. AIAA-95-0810, 1995.
- [5] Burrus D L, Johnson A W, Roquemore W M, et al. Performance assessment of prototype trapped vortex combustor concept for gas turbine application[R]. ASME 2001-GT-0087.
- [6] 邢菲, 樊未军, 柳杨, 等. 凹腔油气匹配对驻涡燃烧室点火性能影响试验[J]. 推进技术, 2008, 29(4): 412-416, 421.
XING Fei, FAN Weijun, LIU Yang, et al. Ignition and lean blow out performance of TVC with different fuel-air matching forms[J]. Journal of Propulsion Technology, 2008, 29(4): 412-416, 421. (in Chinese)
- [7] Hendricks R C. Experimental and computational study of trapped vortex combustor sector rig with tri-pass diffuser

- [R]. NASA/TM-2004-212507, 2004.
- [8] Straub D L, Casleton K H, Lewis R E, et al. Assessment of rich-burn, quick-mix, lean-burn trapped vortex combustor for stationary gas turbines[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines Power, 2005, 127(1): 36-41.
- [9] Zelina J, Shouse D T, and Stutrud J S. Exploration of compact combustors for reheat cycle aero engine applications [R]. ASME GT2006-90179, 2006.
- [10] 樊未军, 严明, 易琪, 等. 富油/快速淬熄/贫油驻涡燃烧室低 NO_x 排放[J]. 推进技术, 2006, 27(1): 88-91.
FAN Weijun, YAN Ming, YI Qi, et al. Low NO_x emission of rich-burn, quick-mix, lean-burn trapped vortex combustor[J]. Journal of Propulsion Technology, 2006, 27(1): 88-91. (in Chinese)
- [11] CHENG Xianlin, Sekar B, Zelina J, et al. Numerical simulation of inter-turbine (ITB) flows with the inclusion of v-gutter flame holders[R]. ASME GT2008-50337, 2008.
- [12] Buehrle R. Numerical simulation of the RTA combustion rig[R]. NASA/TM-2005-213899, 2005.
- [13] 孔祥雷, 樊未军, 邢菲, 等. 单涡/贫油驻涡燃烧室的出口温度分布试验[J]. 航空动力学报, 2010, 25(4): 1000-8055.
KONG Xianglei, FAN Weijun, XING Fei, et al. Experimental study on outlet temperature distribution in single vortex/lean oil trapped vortex combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(4): 1000-8055. (in Chinese)